



DE3819205

Biblio

Beschr

Anspr

Seite 1

Zeichg




## Bearing for the radial and axial support of a rotor with a large radial extension

Veröffentlichungsnr. (Sek.) DE3819205  
 Veröffentlichungsdatum : 1989-06-22  
 Erfinder : BICHLER UDO JOERG DR ING (DE)  
 Anmelder : TELDIX GMBH (DE)  
 Veröffentlichungsnummer : ☐ DE3819205  
 Aktenzeichen:  
 (EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19883819205 19880606  
 Prioritätsaktenzeichen:  
 (EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19883819205 19880606; DE19873742200 19871212  
 Klassifikationssymbol (IPC) : F16C32/04; G05D3/12; H02K7/09  
 Klassifikationssymbol (EC) : F16C39/06  
 Korrespondierende Patentschriften

### Bibliographische Daten

Bearing for the radial and axial support of a rotor (10) with a large radial extension on a stator (1), with stabilisation of the rotor (10) about its tilting axes X, Y. To determine the tilt angle, each of the two tilting axes X, Y is assigned two clearance sensors (22, 24; 23, 25), connected to controllers (29). As a function of the output signal of the clearance sensors (22, 24; 23, 25), the controllers (29) generate control currents for control coils (17, 19; 18, 20) arranged on the stator (1) and assigned to the tilting axes X, Y, and, in conjunction with permanent magnet rings (21) arranged on the rotor (10), these exert torques on the rotor (10), thereby influencing the tilt angle. The controllers (29) have mutual coupling (in 31) and this cancels out the coupling of the tilting axes X, Y caused by the gyro effects. The controllers (29) are PD controllers. In one embodiment of the coupling (31), its gain  $V_r$  is varied in a manner proportional to the square of the speed  $n$  of the rotor (10) and its time constant  $T_r$  is varied in inverse proportion to the speed  $n$  of the rotor (10). The central bearing for the radial movements in the X/Y direction is either passive, incorporating a permanent magnet, or active, incorporating an electromagnet. In the latter case, the radial position controllers are PD controllers, the parameters of which can be switched between a

"soft" and a "hard" mode of operation in order ... Original abstract incomplete. 

Daten aus der esp@cenet Datenbank - - I2



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 38 19 205 C 2

51 Int. Cl.<sup>6</sup>  
F 16 C 32/04  
H 02 K 7/09  
G 05 D 3/12

21 Aktenzeichen: P 38 19 205.5-51  
22 Anmeldetag: 6. 6. 88  
43 Offenlegungstag: 22. 6. 89  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 15. 7. 99

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

- 68 Innere Priorität:  
P 37 42 200. 6 12. 12. 87
- 73 Patentinhaber:  
Teldix GmbH, 69123 Heidelberg, DE
- 74 Vertreter:  
Patentanwälte MÜLLER & HOFFMANN, 81667 München
- 72 Erfinder:  
Bichler, Udo Jörg, Dr.-Ing., 6900 Heidelberg, DE
- 58 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:
- |    |              |
|----|--------------|
| DE | 30 11 546 C2 |
| DE | 33 40 909 A1 |
| DE | 32 43 641 A1 |
| DE | 32 41 507 A1 |
| DE | 32 08 133 A1 |
| DE | 31 30 974 A1 |
| DE | 27 13 619 A1 |
| DE | 26 58 668 A1 |

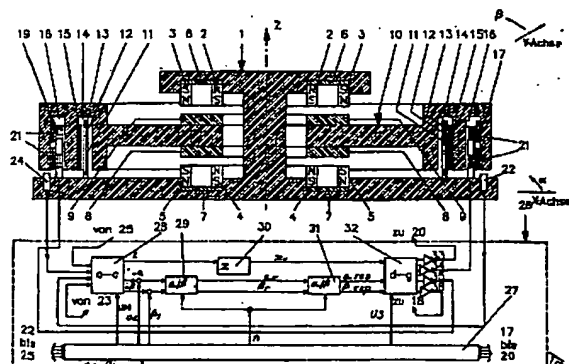
DE	25 00 211 A1
DD	13 659
FR	25 72 141 A1
US	42 11 452
US	40 65 189
EP	02 01 894 A2
WO	87 00 360 A1
WO	84 01 802 A1

DE-Z: KLIMEK, W.: Ein Beitrag zur meßtechnischen  
Anwendung der aktiven elektromagnetischen  
Lagerung  
In: DFVLR Deutsche Luft- und Raumfahrt  
Forschungs-  
bericht 72-30, Braunschweig 1972, S.24 ff.u.73 ff;  
JP 59 170526 A. In: Patents Abstracts of Japan,  
M-355, Febr.2, 1985, Vol.9, No.25;  
JP 61 52411 A. In: Patents Abstracts of Japan,  
M-501, July 24, 1986, Vol.10, No.211;  
Etz Bd. 95 (1974) Heft 10, S. 520-523,  
Werner Braun: Aktive Lagerung umlaufender  
Körper;

54 Lagerung eines Rotors mit großer radialer Ausdehnung

- 57 Lagerung eines Rotors, der eine große radiale Ausdehnung im Vergleich zu seiner axialen Ausdehnung hat, gegen einen Stator mit folgenden Merkmalen:
- a) der Rotor (10) ist um aktuelle Kippachsen kippbar, die senkrecht zu seiner Drehachse (Z) verlaufen,
- b) auf dem Rotor (10) sind coaxial zu seiner Drehachse zwei entgegengesetzt polarisierte Permanentmagnetringe (21) angeordnet,
- c) den Permanentmagnetringen (21) benachbart sind auf dem Stator (1) Regelspulen (17 bis 20) um den Rotor (10) verteilt angeordnet, denen zwei zueinander und auf der Drehachse (Z) senkrecht stehende Kippachsen (X bzw. Y) fest zugeordnet sind und die in Verbindung mit den Permanentmagnetringen (21) Momente auf den Rotor im Sinne einer Kippung um die fest zugeordneten Kippachsen ausüben können,
- d) es sind Abstandssensoren (22 bis 25) um den Rotor verteilt vorgesehen, aus deren Meßwerten die Lage der aktuellen Kippachse und der zugehörige Kippwinkel des Rotors hervorgeht,
- e) eine Steuer- und Regeleinheit (26) ist vorgesehen, die Proportional-Differential-Regler (29) und eine Entkopplungseinrichtung (31) aufweist zur Regelung des Stroms in jeder Regelspule (17 bis 20) in Abhängigkeit von der Lage der aktuellen Kippachse und dem zugehörigen Kippwinkel des Rotors, zur Stabilisierung oder Einstellung der Kippage des Rotors, wobei

- f) den Abstandssensoren (22 bis 25) die Proportional-Differential-Regler nachgeschaltet sind, von denen
- g) ein erster Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um eine der fest zugeordneten Kippachsen (X bzw. Y) verursacht sind, während ein zweiter Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um die andere fest ...



BUNDESDRUCKEREI 05.99 902 128/5/9

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Lagerung eines Rotors mit großer radialer Ausdehnung gemäß den Merkmalen des Anspruchs 1.

Aus der DE-OS 32 43 641 ist bekannt, daß für Rotoren, die gegenüber ihrer axialen Länge eine große radiale Ausdehnung aufweisen, mechanische Lager, aber auch elektrodynamische Magnetlager verwendbar sind und daß man die Kippachsen des Rotors regeln kann, um zum einen Störmomenten und Eigenschwingungen wirksam begegnen zu können, zum anderen um bestimmte Momente zu erzeugen, die in der Art von Kreiselmomenten eine Schwenkung des Rotors zu bewirken.

Aus der DE-OS 32 40 809 ist ein Magnetlager bekannt, bei dem der Luftspaltdurchmesser groß gegenüber der axialen Länge des Lagers ist. Der Rotor ist durch zumindest auf der Rotorseite angeordnete Permanentmagnete radial passiv gelagert, während die axiale Lage des Rotors durch eine Regeleinrichtung aktiv geregelt wird. Zur Bestimmung der axialen Lage des Rotors sind mehrere Sensoranordnungen sowie zur Ausübung von Kräften auf den Rotor Regelverstärker und Wicklungen verwendet. Vier Sensoren sind auf zueinander und zur Drehachse senkrecht stehenden Sensorachsen jeweils paarweise diametral zur Drehachse liegend angeordnet. Es sind drei Regelverstärker vorgesehen, von denen dem ersten und zweiten jeweils die Differenz der Sensorsignale einander diametral gegenüberliegenden Sensoren und dem dritten die Summe aller Sensorausgangssignale zugeführt werden. Die Ausgänge der Regelverstärker sind mit Wicklungen derart verbunden und die Wicklungen derart angeordnet,

- daß bei Ansteuerung des ersten bzw. zweiten Verstärkers auf den Rotor Rückstellmomente jeweils um diejenige Achse einwirken, die zu der zugehörigen Sensorachse senkrecht liegt und
- daß bei Ansteuerung des dritten Verstärkers eine axiale Rückstellkraft auf den Rotor einwirkt.

Weiter ist aus dieser Schrift bekannt, daß die Eingangssignale des ersten und zweiten Energieverstärkers gekoppelt sind, d. h., ein Teil des Eingangssignals eines Verstärkers wird dem Eingangssignal des anderen Verstärkers überlagert.

Aus der DE-OS 32 41 507 ist ein Steuersystem für eine magnetische Lagereinrichtung mit einer Kreuzkopplung bekannt. Ziel dieser Kreuzkopplung ist es, Präzessions- und Nutationschwingungen zu dämpfen.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Lagerung zu schaffen, die in einem weiten Drehzahlbereich und auch für sogenannte "mikro-g"-Umgebungen ohne Probleme anwendbar ist.

Diese Aufgabe wird jeweils durch die im ersten und im zweiten Patentanspruch angegebenen Merkmale gelöst.

Vorteile dieser Erfindung bestehen in der Möglichkeit des aktiven Schwenkens der Kippachsen zur Erzeugung von Drehmomenten in der zur Drehachse und zur aktiv geschwenkten Kippachse senkrechten zweiten Kippachse ohne weiteren Aufwand durch das Regelprinzip, sowie in der Verwendung des Lagers bei Rotoren geringer Höhe.

Weitere Vorteile ergeben sich aus den Unteransprüchen und aus der Beschreibung. So ergibt sich z. B. aus den Ansprüchen 4 bis 7 ein im Zusammenhang mit der Lagerung gemäß den Ansprüchen 1, 2, 3, 15 und 16 besonders günstiges Ausführungsbeispiel der Lagerung, welches aber auch unabhängig von den beschriebenen Regelungsmechanismen mit anderen Regelungsprinzipien verwendbar ist. Aus den

Ansprüchen 21 und 22 ergibt sich eine durch eine Überwachungsschaltung mögliche Umschaltung bei einem fehlerhaften Abstandssensor oder bei einer fehlerhaften Regelspule, so daß die Funktionsfähigkeit der Lagerung auch nach dem Ausfall dieser Teile erhalten bleibt.

Der Vorteil einer besonderen Ausführung der Erfindung gemäß Anspruch 23 besteht darin, daß die Regelung für das aktive Zentrallager umschaltbar ist. Sind starke radiale Störungen zu erwarten, wie sie bei Manövern eines Raumflugkörpers auftreten können, so wird eine "harte" Regelung verwendet.

Wird die Lagerung dagegen in "mikro-g"-Umgebung betrieben, so wird eine "weiche" Regelung bevorzugt.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand mehrere Ausführungsbeispiele näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 eine Darstellung eines Schnitts durch die Achse eines Lagers mit Regel- und Steuereinheit,

Fig. 2 einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 1,

Fig. 3 die Lage von vier Regelspulen,

Fig. 4 das detaillierte Regelprinzip der Lagerung in einem Blockschaltbild, mit nicht drehzahlabhängiger Änderung von Kippregler-Parametern,

Fig. 5 das detaillierte Regelprinzip einer Weiterbildung in einem Blockschaltbild mit drehzahlabhängiger Änderung der Kippregler-Parameter,

Fig. 6 eine Dämpferspule in einer Abwicklung,

Fig. 7 eine Weiterbildung des Lagers nach Fig. 1 mit einem aktiven Zentrallager,

Fig. 8 eine Schnittdarstellung durch das aktive Zentrallager nach Fig. 7 senkrecht zu dessen Achse und

Fig. 9 das Regelprinzip für das Zentrallager.

In Fig. 1 ist mit 1 der Stator, mit 10 der Rotor und mit 26 die Steuer- und Regeleinheit bezeichnet.

Der Stator 1 trägt zentral jeweils axial versetzt zwei axial magnetisierte Permanentmagnetringe 2 bis 5 mit zugehörigen ringförmigen Jochplatten 6, 7 aus weichmagnetischem, hochpermeablem Material. Dazugehörige Rückschlußringe 8, 9 befinden sich auf dem Rotor 10 und bestehen ebenfalls aus weichmagnetischem, hochpermeablem Material. Die Permanentmagnetringe 2 bis 6 bilden zusammen mit den Jochplatten 6, 7 und den Rückschlußringen 8, 9 ein axial (in Z-Richtung) instabiles, radial (in X- und Y-Richtung) stabiles passives Magnetlager. Durch die Wahl geeigneter Verhältnisse von Durchmesser der Permanentmagnetringe 2 bis 5 und Weite der Luftspalte wird die passive Kippsteifigkeit zu Null eingestellt.

Am äußeren Umfang des Rotors 10 befinden sich zwei ringförmige Rotorluftspalte 14, 16.

Der äußere Rotorluftspalt 16 dient zur Erzeugung von axialen Kräften (in Z-Richtung) und Drehmomenten (im  $\alpha$ - und  $\beta$ -Drehsinn). Zu diesem Zweck befinden sich an der äußeren Begrenzungswand des Rotorluftspaltes 16 zwei entgegengesetzt radial magnetisierte Permanentmagnetringe 21, die einen magnetischen Fluß  $\Phi_R$  (siehe Fig. 2) in der dargestellten Weise erzeugen. Am Stator 1 sind vier Regelspulen 17 bis 20 (siehe auch Fig. 3) angeordnet, die in den äußeren Rotorluftspalt 16 so eintauchen, daß sie sich größtenteils im Feld der Permanentmagnetringe 21 befinden. Die Regelspulen 17 bis 20 erstrecken sich jeweils über 90 Grad des mittleren äußeren Rotorluftspaltsumfangs.

Der innere Rotorluftspalt 14 dient zur Erzeugung von axialen Drehmomenten (um die Z-Achse) und von radialen Kräften (in X- und Y-Richtung). Zu diesem Zweck befindet sich an der äußeren Begrenzungswand des inneren Rotorluftspaltes 14 ein in Umfangsrichtung alternierend radial magnetisierter Permanentmagnetring 15. Am Stator 1 sind eine Dämpferspule 11 und eine Motorspule 12 angeordnet, die in

den inneren Rotorluftspalt 14 so eintauchen, daß sich nur die in Z-Richtung verlaufenden Spulenteile im Feld des Permanentmagnetings 15 befinden. Die Spulen 11, 12 erstrecken sich über den gesamten mittleren inneren Rotorluftspaltumfang. Zusammen mit dem Permanentmagnetring 15 bildet die Spule 12 einen eisenlosen, elektronisch zu kommutierenden Gleichstrommotor.

Die Dämpferspule 11 ist kurzgeschlossen und so geschaltet, daß bei Drehung des Rotors 10 um die Drehachse kein bremsendes Drehmoment entsteht, jedoch bei einer translatorischen Bewegung des Rotors 10 in X- oder Y-Richtung jeweils in der Dämpferspule 11 durch das Feld des Permanentmagnetings 15 Spannungen so induziert werden, daß Ströme und damit Kräfte entstehen, die der jeweiligen Bewegungsrichtung entgegenwirken. Die Dämpferspule 11 bildet daher zusammen mit dem Permanentmagnetring 15 eine passive radiale Dämpfungseinrichtung.

Die axiale Auslenkung des Rotors 10 in Z-Richtung wird von vier berührungslos arbeitenden Abstandssensoren 22 bis 25 erfaßt, die in jeweils 90 Grad Abstand auf der X- und Y-Achse des Stators angeordnet sind.

Durch geeignete Verknüpfung der Signale der vier Abstandssensoren 22 bis 25 in einer Additionseinheit 28 werden redundant die axiale Auslenkung  $z$  und beide Kippwinkel  $\alpha$  und  $\beta$  des Rotors 10 gewonnen. Durch ein Umschalt-Signal UM, das durch Plausibilitätskontrolle der vier Abstandssensorsignale in einer Adaption- und Überwachungseinheit 27 entsteht, wird im Falle einer Störung eines der vier Abstandssensoren 22 bis 25 auf eine Istwerterfassung mit den jeweils verbleibenden drei Abstandssensoren umgeschaltet, wobei die gleichen Eingangssignale  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $z$  für in einem Block 29 zusammengefaßte Kippregler und einen Z-Regler 30 erzeugt werden müssen.

Der axiale Istwert  $z$  wird einem Z-Regler (Proportional-Differential-Regler mit überlagerter Zero-Power-Regelung) 30 zugeführt, der daraus ein axiales Stellsignal  $z_r$  erzeugt.

Die beiden Kippwinkelstwerte  $\alpha$ ,  $\beta$  werden, mit den jeweiligen Sollwerten  $\alpha_s$ ,  $\beta_s$  verknüpft, den Kippreglern 29 zugeführt, die daraus die Signale  $\alpha_r$  und  $\beta_r$  erzeugen.

Die Ausgangssignale  $\alpha_r$  und  $\beta_r$  der Kippregler 29 werden in einer Entkopplungseinrichtung 31, die die durch Kreiseffekte verursachte Verkopplung der Kippungen um die Kippachsen X, Y des Rotors aufhebt, zu den Signalen  $\alpha_{rep}$  und  $\beta_{rep}$  verarbeitet. Die Parameter dieser Entkopplungseinrichtung 31 werden abhängig von der Drehzahl  $n$  des Rotors 10 verändert.

Die Entkopplung kann in zwei unterschiedlichen Versionen ausgeführt werden. Eine Version bedingt, daß die Parameter der Kippregler 29 unabhängig von der Drehzahl  $n$  des Rotors 10 sind. Bei der anderen Version werden die Parameter der Kippregler 29 in Abhängigkeit von der Drehzahl  $n$  des Rotors 10 verändert. (In den Fig. 1 und 7 werden beide Versionen durch eine gestrichelte Linie vom Verzweigungspunkt  $n$  zu den Kippreglern 29 dargestellt.)

Durch eine geeignete Verknüpfung in einer Additionseinheit 32 werden aus den drei Signalen  $z_r$ ,  $\alpha_{rep}$  und  $\beta_{rep}$  redundant Sollwerte für vier um 90 Grad versetzte Kräfte berechnet, die in Z-Richtung auf den Umfang des Rotors 10 wirken. Diese Kräfte werden dann mit Hilfe von stromeinprägenden Leistungsverstärkern 33 bis 36, die Ströme in den Regelspulen 17 bis 20 erzeugen, in Kräfte umgesetzt, so daß die gewünschten Axialkräfte und Kippmomente entstehen. Durch ein Umschalt-Signal US, das durch Plausibilitätskontrolle der vier Spulenströme in der Adaption- und Überwachungseinheit 27 entsteht, wird im Falle einer Störung in einem der vier Leistungsverstärker 33 bis 36 oder einer der vier Regelspulen 17 bis 20 auf eine Stromsteuerung mit den drei verbleibenden, funktionsfähigen Leistungsverstärkern

mit den zugehörigen Regelspulen umgeschaltet, wobei die Ströme nach dem Umschalten so bemessen sein müssen, daß unverändert Kippmomente bzw. axiale Kräfte auf den Rotor 10 ausgeübt werden. Zur Anpassung und Überwachung werden der Adaption- und Überwachungseinheit 27 die Signale der Regelspulen 17 bis 20, der Abstandssensoren 22 bis 25, sowie die Sollwerte  $\alpha_s$ ,  $\beta_s$  zugeführt.

In Fig. 2 ist der linke Lagerteil der Schnittdarstellung des Lagers nach Fig. 1 detailliert gezeigt. Mit 14 und 16 sind die beiden ringförmigen Rotorluftspalte bezeichnet. In den inneren Rotorluftspalt 14 ragt die am Stator 1 befestigte Dämpferspule 11 und die ebenfalls am Stator 1 befestigte Motorspule 12 hinein. An der äußeren Begrenzungswand des inneren ringförmigen Motorluftspalts 14 befindet sich ein in Umfangsrichtung alternierend radial magnetisierter Permanentmagnetring 15, dessen magnetischer Fluß von der Dämpferspule 11 und von der Motorspule 12 genutzt wird.

Im äußeren ringförmigen Rotorluftspalt 16 sind die Regelspulen 17 bis 20 untergebracht. An der äußeren Begrenzungswand des äußeren Rotorluftspalts 16 sind übereinander zwei entgegengesetzt magnetisierte Permanentmagnetringe 21 angeordnet, die einen magnetischen Fluß  $\Phi_R$  erzeugen, der die Regelspulen 17 bis 20 durchsetzt.

Fig. 3 zeigt die vier Regelspulen 17 bis 20, die sich jeweils über 90° des äußeren Rotorluftspalts 16 erstrecken und so am Stator 1 befestigt sind, daß sich die Regelspulen 17 und 19 um 180° gegeneinander versetzt auf der X-Achse (siehe auch Fig. 1) und die Regelspulen 18 und 20 um 180° gegeneinander versetzt auf der Y-Achse (siehe auch Fig. 1) des Lagers befinden.

In der Zeichnung werden in den regelungstechnischen Blockschaltbildern Produkte der Zeitkonstanten mit der unabhängigen Variablen  $s$  der Laplace-Transformation als  $T_{0s}$ ,  $T_{1s}$ ,  $T_{2s}$ ,  $T_{3s}$  und  $T_{4s}$  bezeichnet, wobei  $T_0$  die Grund-Regler-Zeitkonstante,  $T_1$  die Axial-Regler-Zeitkonstante,  $T_2$  die Zeitkonstante des Entkopplungsintegrators,  $T_3$  die Gesamt-Regler-Zeitkonstante und  $T_4$  die Zero-Power-Regler-Zeitkonstante bezeichnet.

Fig. 4 zeigt das detaillierte Regelprinzip in einem Blockschaltbild mit nicht drehzahlabhängiger Änderung der Kippregler-Parameter. Die Signale der Abstandssensoren 22 bis 25 ergeben addiert die axiale Auslenkung  $z$ . Das Signal des Abstandssensors 24 minus dem Signal des Abstandssensors 22 ergibt den negativen Kippwinkel  $\alpha$  (Additionspunkt b) und das Signal des Abstandssensors 23 minus dem Signal des Abstandssensors 25 ergibt den negativen Kippwinkel  $\beta$  (Additionspunkt c).

Die Signale der Abstandssensoren 22 bis 25 werden addiert (Additionspunkt a) und als axiale Absenkung  $z$  in dem Z-Regler 30, einem Proportional-Differential-Regler mit der Reglerverstärkung  $V_0$ , der Regler-Zeitkonstante  $T_1$  und zusätzlicher Zero-Power-Regelung, bewirkt durch den mitgekoppelten Integrator  $1/T_{2s}$ , zu dem Ausgangssignal  $z_r$  verarbeitet, das gleichzeitig auf alle vier Leistungsverstärker 33 bis 36 gegeben wird, deren Ausgangssignale zu den Regelspulen 17 bis 20 geführt werden. Die Regelabweichungen der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Verschwenkungen werden von Kippreglern 29 (Proportional-Differential-Reglern) mit den Parametern  $V_1$  (Gesamt-Regler-Verstärkung) und  $T_3$  (Gesamt-Regler-Zeitkonstante) zu den Signalen  $\alpha_r$  und  $\beta_r$  verarbeitet.

Die Ausgangssignale  $\alpha_r$  und  $\beta_r$  der Kippregler werden durch eine integrierende, in ihrer Zeitkonstante  $T_4$  umgekehrt proportional nachgeführte, wechselseitig wirkende Vorwärtskoppelung in der Entkopplungseinrichtung 31 miteinander verknüpft, die die durch die Kreiseffekte verursachte Verkopplung der Kippachsen X und Y des Rotors 10 aufhebt. Damit wird eine Nutationschwingung verhindert;  $T_n = T_4/2\pi n$ .

Die Integrationszeitkonstante  $T_0$  der Entkopplungseinrichtung 31 ist das Verhältnis von Axial- zu Kippträgheitsmoment des Rotors 10. Falls im Zentrallager (1 bis 10) eine passive Kippdämpfung existiert, so kann diese mit dem Faktor D berücksichtigt werden.

Das passive Kippmoment des Zentrallagers (1 bis 10) wird, soweit vorhanden, durch den Faktor  $K_p$ , der aus der Kippauslenkung ein entsprechendes Gegenmoment ableitet, neutralisiert. Damit wird eine Präzessionsschwingung verhindert. Eine nichtlineare Kippmomentcharakteristik kann durch eine inverse Kennlinie  $K_p = f(\alpha)$  bzw.  $K_p = f(\beta)$  kompensiert werden.

Über die Additionspunkte d, f und e, g werden die Signale  $\alpha_{\text{reg}}$  und  $\beta_{\text{reg}}$  den entsprechenden Leistungsverstärkern 34, 35; 33, 36 und den Regelspulen 17, 19; 18, 20 zugeführt.

Fig. 5 zeigt das detaillierte Regelprinzip einer Weiterbildung in einem Blockschaltbild mit drehzahlabhängiger Änderung der Kippregler-Parameter. Das Regelprinzip nach Fig. 5 unterscheidet sich von dem Reglerprinzip nach Fig. 4 nur im Bereich der Kippregler 29 und der Entkopplungseinrichtung 31; deswegen wird hier nur auf die Unterschiede zur Fig. 4 eingegangen.

Die Regelabweichung der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Schwenkungen werden von nunmehr adaptiven Kippreglern 29 zu den Signalen  $\alpha$  und  $\beta$  verarbeitet. Die Verstärkung  $v_r \sim V_0 \cdot n^2$  dieser Kippregler wird proportional zum Quadrat der Drehzahl  $n$  verändert. Die Zeitkonstante  $T_r = T_0/n$  der Kippregler 29 wird umgekehrt proportional zur Drehzahl  $n$  nachgeführt. Damit werden jetzt die Kippregler 29 an die sich mit der Drehzahl  $n$  ändernden Eigenschaften der jetzt rückwärts-entkoppelten Entkopplungseinrichtung 31 angepaßt.

Die Kippregleradaption wird unterhalb einer Minimaldrehzahl  $UB$  ausgesetzt, die Parameter bleiben in diesem Bereich konstant,  $V_r = V_0$ ,  $T_r = T_0$ .

Die Ausgangssignale  $\alpha_r$  und  $\beta_r$  werden durch eine integrierende, in ihrer Zeitkonstante  $T_n$  umgekehrt drehzahlproportional nachgeführte, wechselseitige Rückwärtsverkopplung miteinander verknüpft, die die durch die Kreiseffekte verursachte Verkopplung der Kippachsen X und Y des Rotors 10 aufhebt. Damit wird eine Nutationsbewegung verhindert;  $T_n = T_0/2\pi n$ . Die Integrationszeitkonstante  $T_0$  der Entkopplungseinrichtung 31 ist wiederum das Verhältnis von Axial- zu Kippträgheitsmoment des Rotors 10. Falls im Zentrallager (1 bis 10) eine passive Kippdämpfung existiert, so kann diese mit dem Faktor D berücksichtigt werden. Ein kleiner Anteil von D ist jedoch stets zur Vermeidung einer Dauerschwingung in der Entkopplungseinrichtung vorzusehen.

In Fig. 6 wird ein Ausführungsbeispiel einer Dämpferspule 11 in einer Abwicklung über  $360^\circ$  gezeigt. Mit 37 und 38 sind in diesem Beispiel zwei unabhängige mäanderförmige Drähte bezeichnet. Die Dämpferspule 11 kann auch aus jedem anderen geradzahlig Vielfachen von Drähten gebildet werden.

Die ansteigenden und abfallenden Anteile 40, 39 des Mäanders sind parallel zur Rotorachse ausgerichtet und im wesentlichen den alternierenden Permanentmagneten des Permanentmagnetrings 15 gegenüber angeordnet. Die dazu senkrechten Anteile 41 des Mäanders verlaufen axial versetzt außerhalb der Permanentmagnete. Die Breite 42 eines Mäanders entspricht einer Polbreite eines Magneten des Permanentmagnetrings 15.

Auf dem  $360^\circ$ -Umfang der Dämpferspule 11 sind für beide Drähte 37, 38 jeweils zwei um  $180^\circ$  versetzte Mäander doppelter Breite 43, 44 vorgesehen, die von Draht 37 zu Draht 38 außerdem noch einen Versatz von  $90^\circ$  aufweisen. Hierdurch wird erreicht, daß die Mäander von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  und von  $180^\circ$  bis  $360^\circ$  bei Draht 37 bzw. von  $90^\circ$  bis  $270^\circ$

und von  $270^\circ$  bis  $90^\circ$  bei Draht 38 unterschiedlichen Magnetpolen gegenüberstehen. Dadurch wird erreicht, daß die Dämpferspule 11 bei Drehung des Rotors 10 kein Bremsmoment, bei translatorischen Bewegungen des Rotors 10 jedoch eine Bremskraft erzeugt.

Die Fig. 7 und 8 zeigen eine Weiterbildung des Lagers nach Fig. 1 mit aktivem Zentrallager.

Der Stator ist mit 1, der Rotor mit 10 und die Steuer- und Regeleinheit mit 26 bezeichnet.

Der Stator 1 trägt zentral ein aktives radiales Zentrallager 47 bis 52, welches in einem am Rotor 10 befestigten, kugelsymmetrischen, tonnenförmigen Körper 52 aus weichmagnetischem Material als magnetischem Rückschluß untergebracht ist. Die Tonnenform des Körpers 52 hat den Schwerpunkt 45 des Rotors 10 als Mittelpunkt.

Am Stator 1 sind am äußeren Umfang, gegenüber dem Körper 52 vier Elektroden 46a bis 46d auf der X- und der Y-Achse um jeweils  $90^\circ$  versetzt angeordnet, die zusammen mit dem Rotor 10 und Jocheisen 47 bis 50 kapazitive Abstandssensoren bilden. Hierbei dienen die Jocheisen 47 bis 50 als Sendelektroden, der Rotor 10 als Reflexionselektrode und die Elektroden 46a bis 46d als Empfangselektroden. Ebenfalls auf der X- und auf der Y-Achse sind vier um jeweils  $90^\circ$  versetzte Spulen 51a bis 51d angeordnet. Die Jocheisen 47 bis 50, die Spulen 51a bis 51d und der kugelsymmetrische tonnenförmige Körper 52 bilden vier um  $90^\circ$  versetzte, magnetisch getrennte Elektromagnet-Segmente, die paarweise gegenüberliegend und unabhängig voneinander aktiviert werden können. Die magnetische Trennung kann z. B. dadurch erreicht werden, daß die Elektromagnet-Segmente durch Luftspalte 55 (Fig. 8) voneinander getrennt sind und der Lagerdorn 56 (Fig. 8) aus einem niedrigpermeablen Material hergestellt ist.

Eine radiale Bewegung des Rotors 10 gegenüber dem Stator 1 entlang der X- und/oder der Y-Achse wird durch die kapazitiven Sensoren 10, 46a bis 46d, 47 bis 50 aufgenommen und durch die Elektromagnet-Segmente 47 bis 50, 51a bis 51d, 52 zurückgestellt. Selbstverständlich können auch induktive Sensoren, optische Sensoren oder Sensoren, die auf einem anderen Meßprinzip beruhen, verwendet werden. Das axiale Stellsignal wird durch einen Z-Regler 54 erzeugt.

Die Fig. 8 zeigt einen senkrecht durch die Drehachse geführten Schnitt des aktiven radialen Zentrallagers. Das am Stator 1 angebrachte, ruhende Teil des Zentrallagers besteht aus vier, z. B. durch Luftspalte 55 magnetisch voneinander getrennten  $90^\circ$ -Elektromagnet-Segmenten aus Jocheisen 47 bis 50, Spulen 61a bis 61d und einem im Zentrum des Rotors 10 befindlichen tonnenförmigen Körper 52 (Fig. 7) aus weichmagnetischem Material als magnetischem Rückschluß. Die Elektromagnet-Segmente 47, 51a, 52; 49, 51c, 52; 48, 51b, 52; 50, 51d, 52 sind ebenso wie die Elektroden 46a bis 46d symmetrisch um die X- und Y-Achse angeordnet, wobei der Schwerpunkt 45 den Mittelpunkt bildet. Der Lagerdorn 56 ist zur magnetischen Trennung aus einem niedrigpermeablen Material, z. B. aus Aluminium, hergestellt.

Fig. 9 zeigt das Regelprinzip einer Achse des aktiven radialen Zentrallagers. Die Jocheisen 47, 49 werden von einem Oszillator 57 erregt. Die kapazitiven Sensoren 46a, 46c, 47, 49, 52 erfassen eine radiale Positionsänderung des Rotors 10 gegenüber dem Stator 1 als eine Kapazitätsänderung und führen sie einer Sensor-Auswertelektronik 70 zu. Als Lage-Istwert 58 des Sensorpaares 46a, 46c gelangt das Ausgangssignal der Sensor-Auswertelektronik 70 zu der Eingangsbeschaltung C,  $R_1$ ,  $3R_1$ ,  $S_1$  eines Proportional-Differential-Reglers 69. Die Reglerparameter des Proportional-Differential-Reglers 69 können von einer übergeordneten Überwachungs- und Steuereinheit 60 zwischen "weicher"

und "harter" Regelung umgeschaltet werden. Dies ist dann von Vorteil, wenn starke radiale Störungen erwartet werden sollen – hier wird ein "hartes" Regelverhalten bevorzugt – oder wenn Unwuchtstörungen nur in möglichst geringem Umfang auf den Stator übertragen werden sollen – hier wird ein "weiches" Regelverhalten bevorzugt. Das "harte" Regelverhalten wird dadurch erreicht, daß der Schalter  $S_1$  geschlossen und der Schalter  $S_2$  geöffnet wird. Das "weiche" Regelverhalten wird dadurch erreicht, daß der Schalter  $S_1$  geöffnet und der Schalter  $S_2$  geschlossen wird. Das Ausgangssignal des Proportional-Differential-Reglers 69 wird mit Hilfe der Funktionsblöcke 63, 68 alternativ auf einen der stromeinprägenden Leistungsverstärker 64, 65 gegeben, welche in den Spule 51a oder 51c radiale, auf den Rotor 10 wirkende Kräfte erzeugen.

#### Patentansprüche

1. Lagerung eines Rotors, der eine große radiale Ausdehnung im Vergleich zu seiner axialen Ausdehnung hat, gegen einen Stator mit folgenden Merkmalen:

- a) der Rotor (10) ist um aktuelle Kippachsen kippbar, die senkrecht zu seiner Drehachse (Z) verlaufen,
- b) auf dem Rotor (10) sind koaxial zu seiner Drehachse zwei entgegengesetzt polarisierte Permanentmagnetringe (21) angeordnet,
- c) den Permanentmagnetringen (21) benachbart sind auf dem Stator (1) Regelspulen (17 bis 20) um den Rotor (10) verteilt angeordnet, denen zwei zueinander und auf der Drehachse (Z) senkrecht stehende Kippachsen (X bzw. Y) fest zugeordnet sind und die in Verbindung mit den Permanentmagnetringen (21) Momente auf den Rotor im Sinne einer Kippung um die fest zugeordneten Kippachsen ausüben können,
- d) es sind Abstandssensoren (22 bis 25) um den Rotor verteilt vorgesehen, aus deren Meßwerten die Lage der aktuellen Kippachse und der zugehörige Kippwinkel des Rotors hervorgeht,
- e) eine Steuer- und Regeleinheit (26) ist vorgesehen, die Proportional-Differential-Regler (29) und eine Entkopplungseinrichtung (31) aufweist zur Regelung des Stroms in jeder Regelspule (17 bis 20) in Abhängigkeit von der Lage der aktuellen Kippachse und dem zugehörigen Kippwinkel des Rotors, zur Stabilisierung oder Einstellung der Kipplage des Rotors, wobei
- f) den Abstandssensoren (22 bis 25) die Proportional-Differential-Regler nachgeschaltet sind, von denen
- g) ein erster Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um eine der fest zugeordneten Kippachsen (X bzw. Y) verursacht sind, während ein zweiter Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um die andere fest zugeordnete Kippachse (Y bzw. X) verursacht sind,
- h) die Ausgangssignale der Proportional-Differential-Regler die Eingangssignale der Entkopplungseinrichtung (31) sind,
- i) die Ausgangssignale der Entkopplungseinrichtung (31, Fig. 4) derart zu den Ausgangssignalen der Proportional-Differential-Regler addiert werden, daß jeweils die Ausgangssignale eines der Proportional-Differential-Regler zu den über den anderen Proportional-Differential-Regler und die Entkopplungseinrichtung geführten Ausgangssi-

gnalen unter Berücksichtigung des Vorzeichens zu einem Summensignal addiert werden,

j) die über die Entkopplungseinrichtung geführten Ausgangssignale der Proportional-Differential-Regler in der Entkopplungseinrichtung integriert werden mit einer Integrationszeitkonstante, die der Drehzahl des Rotors umgekehrt proportional ist, und

k) die Summensignale jeweils über Leistungsverstärker (33 bis 36) den Regelspulen (17 bis 20) zugeführt werden.

2. Lagerung eines Rotors, der eine große radiale Ausdehnung im Vergleich zu seiner axialen Ausdehnung hat, gegen einen Stator mit folgenden Merkmalen:

a) der Rotor (10) ist um aktuelle Kippachsen kippbar, die senkrecht zu seiner Drehachse (Z) verlaufen,

b) auf dem Rotor (10) sind koaxial zu seiner Drehachse zwei entgegengesetzt polarisierte Permanentmagnetringe (21) angeordnet,

c) den Permanentmagnetringen (21) benachbart sind auf dem Stator (1) Regelspulen (17 bis 20) um den Rotor (10) verteilt angeordnet, denen zwei zueinander und auf der Drehachse (Z) senkrecht stehende Kippachsen (X bzw. Y) fest zugeordnet sind und die in Verbindung mit den Permanentmagnetringen (21) Momente auf den Rotor im Sinne einer Kippung um die fest zugeordneten Kippachsen ausüben können,

d) es sind Abstandssensoren (22 bis 25) um den Rotor verteilt vorgesehen, aus deren Meßwerten die Lage der aktuellen Kippachse und der zugehörige Kippwinkel des Rotors hervorgeht,

e) eine Steuer- und Regeleinheit (26) ist vorgesehen, die Proportional-Differential-Regler (29) und eine Entkopplungseinrichtung (31) aufweist zur Regelung des Stroms in jeder Regelspule (17 bis 20) in Abhängigkeit von der Lage der aktuellen Kippachse und dem zugehörigen Kippwinkel des Rotors, zur Stabilisierung oder Einstellung der Kipplage des Rotors, wobei

f) den Abstandssensoren (22 bis 25) die Proportional-Differential-Regler nachgeschaltet sind, von denen

g) ein erster Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um eine der fest zugeordneten Kippachsen (X bzw. Y) verursacht sind, während ein zweiter Proportional-Differential-Regler Ausgangssignale abgibt, die von Kippungen um die andere fest zugeordnete Kippachse (Y bzw. X) verursacht sind,

h) bei den Proportional-Differential-Reglern (29) die Verstärkung und die Zeitkonstante bis zu einer vorgegebenen Mindestdrehzahl des Rotors (10) konstant ist und ab dieser Mindestdrehzahl die Verstärkung proportional zum Quadrat der Drehzahl des Rotors (10) und die Zeitkonstante umgekehrt proportional zu dieser Drehzahl geändert wird,

i) die Ausgangssignale der Proportional-Differential-Regler jeweils Eingangssignale eines von zwei Addierern sind, dem zur Addition unter Berücksichtigung des Vorzeichens Signale von einem Ausgang der Entkopplungseinrichtung (31) zugeführt sind, die vom anderen Addierer kommandiert über die Entkopplungseinrichtung (31) geführt sind,

j) die über die Entkopplungseinrichtung (31, Fig.

- 5) geführten Signale in der Entkopplungseinrichtung integriert werden mit einer Integrationskonstante, die der Drehzahl des Rotors umgekehrt proportional ist, und  
 k) die Ausgangssignale der Addierer jeweils über Leistungsverstärker (33 bis 36) zu den Regelspulen (17 bis 20) zugeführt werden.
3. Lagerung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß jeder fest zugeordneten Kippachse (X, Y) zwei gegeneinander geschaltete Abstandssensoren (22, 24; 23, 25) auf dem Stator (1) zugeordnet sind.
4. Lagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem Rotor (10) parallel zur Drehachse (Z) eine Vielzahl von Permanentmagneten (15) angeordnet ist, wobei jeweils benachbarte Permanentmagnete entgegengesetzte Polarität aufweisen, und daß diesen Permanentmagneten gegenüberliegend auf dem Stator (1) wenigstens eine zweiphasige Motorspule (12) angeordnet ist.
5. Lagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem Rotor (10) parallel zur Drehachse (Z) eine Vielzahl von Permanentmagneten (15) angeordnet ist, wobei jeweils benachbarte Permanentmagnete unterschiedliche Polarität aufweisen, und daß diesen Permanentmagneten gegenüberliegend auf dem Stator (1) wenigstens eine Dämpferspule (11) angeordnet ist.
6. Lagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem Rotor (10) parallel zur Drehachse (Z) eine Vielzahl von Permanentmagneten (15) angeordnet ist, wobei jeweils benachbarte Permanentmagnete unterschiedliche Polarität aufweisen, und daß diesen gemeinsam genutzten Permanentmagneten auf dem Stator (1) eine Motorspule (12) und eine Dämpferspule (11) gegenüberstehen.
7. Lagerung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß jede Phase der Motorspule (12) aus einem mäanderförmig aufgebrachten Draht (37, 38) und/oder die Dämpferspule (11) aus wenigstens zwei unabhängigen mäanderförmig aufgebrachten Drähten (37, 38) gebildet ist, wobei die ansteigenden und abfallenden Anteile (39, 40) des Mäanders parallel zur Drehachse (Z) ausgerichtet sind und im wesentlichen den Permanentmagneten (15) gegenüberliegen, während die dazu senkrechten Anteile (13) axial versetzt außerhalb der Permanentmagnete (15) verlaufen, und wobei diese Breite des Mäanders einer Polteilung entspricht, und daß bei der Dämpferspule die Mäander teilweise derart versetzt angeordnet sind, daß die Drehung des Rotors (10) in diesen kein Bremsmoment erzeugt, während jedoch bei translatorischer Bewegung eine Dämpfungskraft für diese Bewegung entsteht.
8. Lagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß eine radiale Lagerung durch wenigstens ein Magnetlager gebildet wird.
9. Lagerung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Magnetlager ein passives Magnetlager ist.
10. Lagerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung des Kippmoments die Regelspulen (17 bis 20) am äußeren Umfang des Stators (1) und die Permanentmagnetringe (21) am äußeren Umfang des Rotors (10) angebracht sind.
11. Lagerung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Rotor (10) an dem Stator (1) mittels eines aktiven Zentrallagers (1, 10, 45 bis 52) gelagert ist, wobei wenigstens zwei den Richtungen (X, Y) der fest zugeordneten Kippachsen zugeordnete Sensoren, bestehend aus Jochheisen (47 bis 50), magnetischem Rückschluß (52) und Elektroden (46), die radiale Position des Rotors (10) erfassen und ihr Ausgangssignal über Leistungsverstärker (64, 65) zur Ausregelung von vom Zentrum des Lagers radial abweichenden Rotor-Positionen jeweils nur einer in jeder Kippachse angeordneten Spule (51) zur Bildung eines Magnetfeldes zugeführt werden.
12. Lagerung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der magnetische Rückschluß (52) des Rotors (10) tonnenförmig ausgebildet ist.
13. Lagerung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Spulen (51a bis 51d) in magnetisch voneinander getrennten 90°-Sektoren angeordnet sind.
14. Lagerung nach Anspruch 1, 2 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß Abstandssensoren (22 bis 25) und die Sensoren (46 bis 50, 52) kapazitive Sensoren sind.
15. Lagerung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Integrationskonstante der Entkopplungseinrichtung dem Verhältnis von Axial- zu Kippträgheitsmoment des Rotors (10) proportional ist.
16. Lagerung nach einem der Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine sensierte axiale Verschiebung (z) des Rotors (10) über einen Proportional-Differential-Regler (30) parallel den zur Kippregelung vorgesehenen Regelspulen (17 bis 20) zur Axialregelung der Lage des Rotors zugeführt wird.
17. Lagerung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß bei Verwendung von den fest zugeordneten Kippachsen (X, Y) zugeordneten Paaren von Abstandssensoren (22, 24; 23, 25) zur Kippwinkelerfassung diese auch als Sensoren für die Axialregelung verwendet werden.
18. Lagerung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die den fest zugeordneten Kippachsen (X, Y) zugeordneten, verknüpften Sensorsignale mit einem Faktor ( $K_p$ ) bewertet den den entsprechenden Regelspulen (17, 19; 18, 20) zugeführten Signalen überlagert werden.
19. Lagerung nach den Ansprüchen 8 und 18, dadurch gekennzeichnet, daß die von der Drehzahl des Rotors (10) unabhängigen, integrierten Eingangssignale von Integrationsgliedern in der Entkopplungseinrichtung (31) mit einem Faktor (D) bewertet und auf den Eingang des jeweiligen Integrationsgliedes zurückgeführt werden.
20. Lagerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei Ausfall eines Abstandssensors (22 bis 25) die Struktur der Verknüpfung der Abstandssensorsignale durch eine Adaptions- und Überwachungseinheit (27) so umgeschaltet wird, daß mit den von der Adaptions- und Überwachungseinheit (27) zu ermittelnden verbleibenden drei funktionsfähigen Abstandssensoren (22 bis 25) die Eingangssignale für die drei Regler (29, 30) zur Lagerung des Rotors gebildet werden.
21. Lagerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei Ausfall eines der vier Leistungsverstärker (33 bis 36) und/oder Regelspulen (17 bis 20) die Struktur der Verknüpfung der aus den Abstandssensorsignalen gewonnenen Regelsignale ( $\alpha_{reg}$ ,  $\beta_{reg}$ ,  $z_r$ ) durch eine Adaptions- und Überwachungseinheit (27) so umschaltbar ist, daß mit den von der Adaptions- und Überwachungseinheit (27) zu ermittelnden drei verbleibenden funktionsfähigen Leistungsverstärkern mit den zugehörigen Regelspulen

die Lageregelung des Rotors erfolgt.

22. Lagerung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Parameter Verstärkung und Zeitkonstante eines Reglers (69) umschaltbar sind, der den einer fest zugeordneten Kippachse (X, Y) zugeordneten 5 Spulen (51) vorgeschaltet ist.

---

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

---

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65



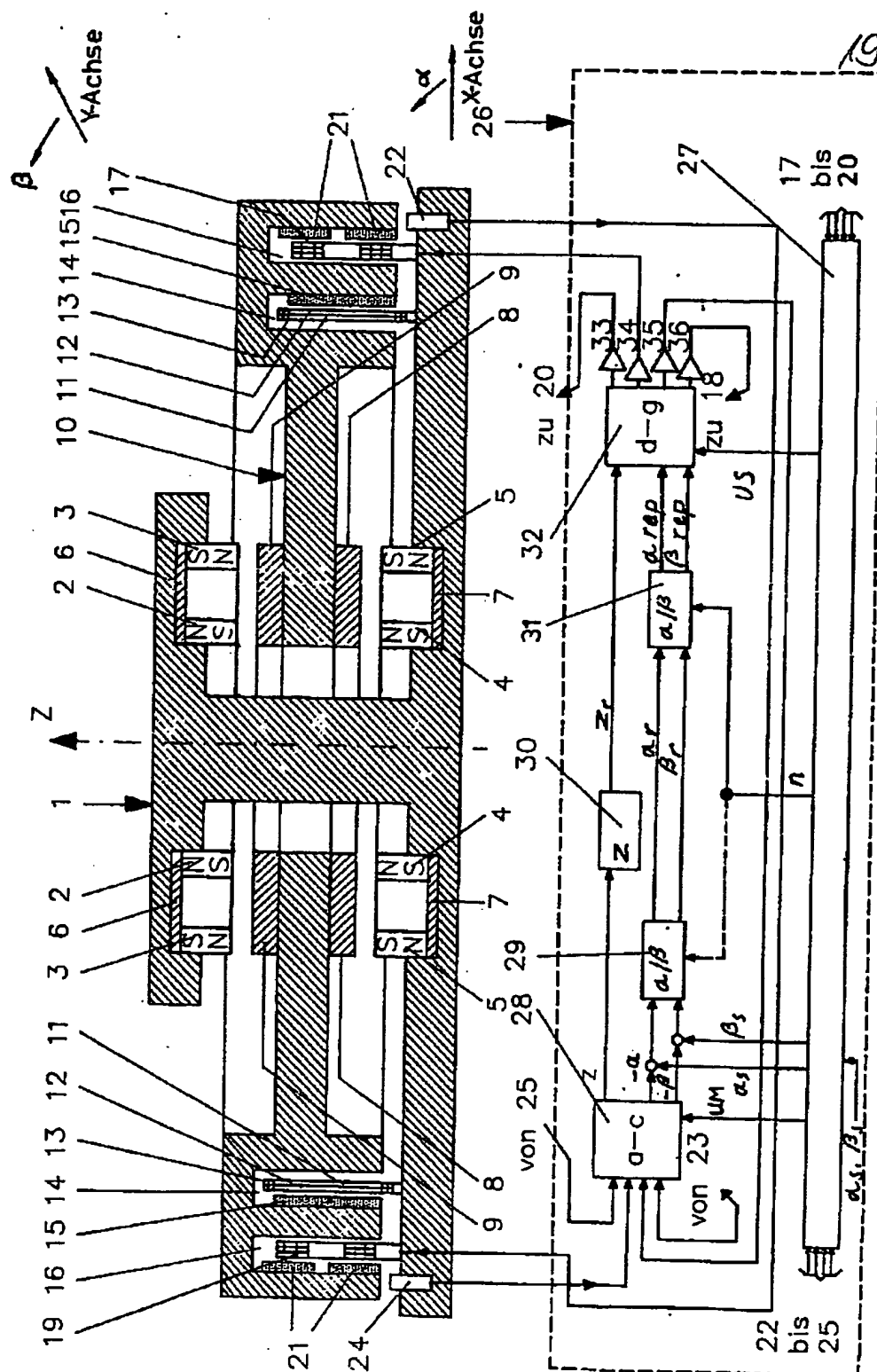


Fig.1

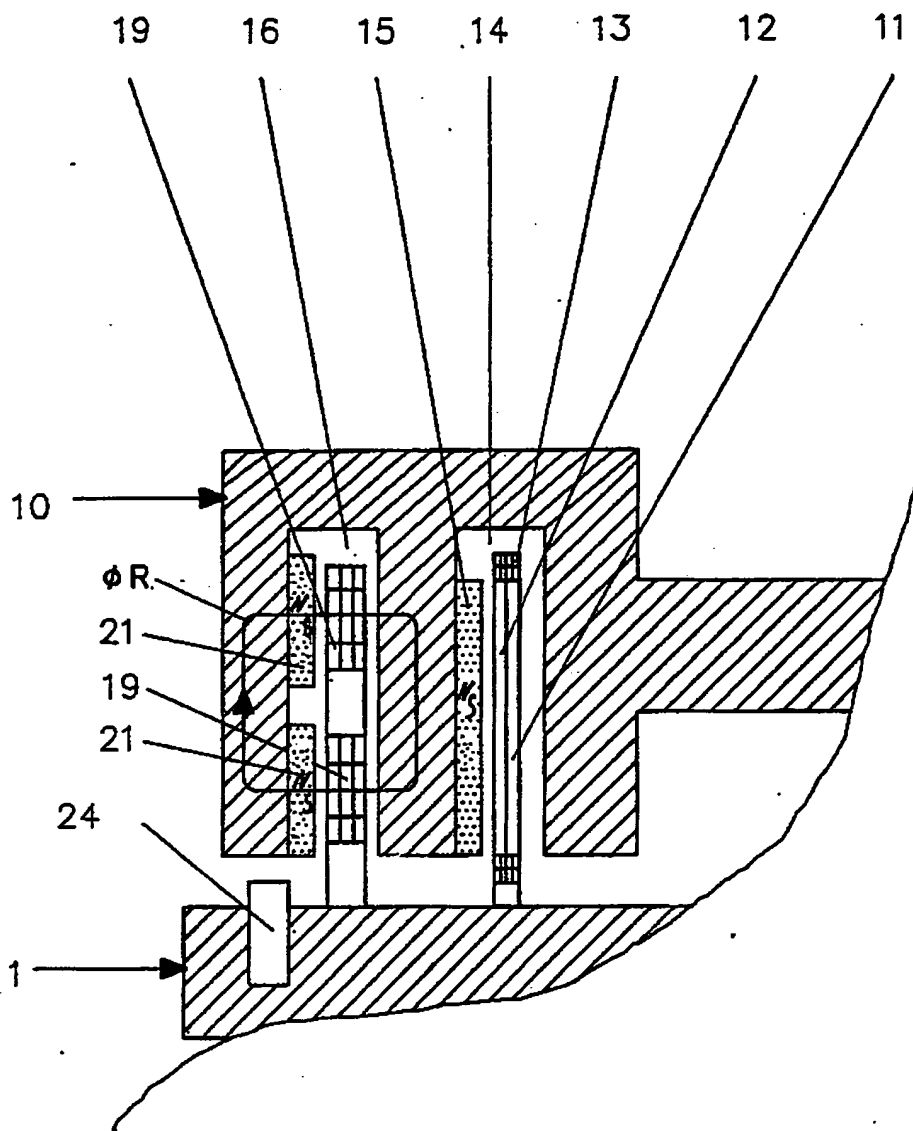


Fig.2

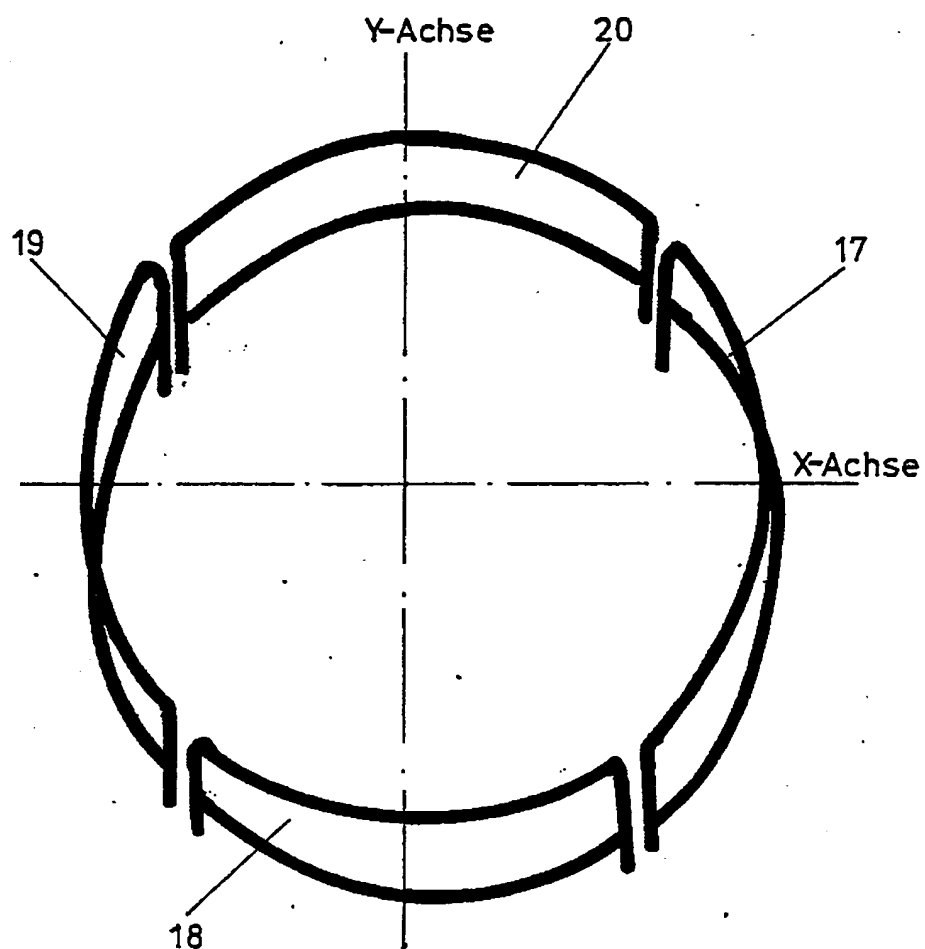


Fig. 3

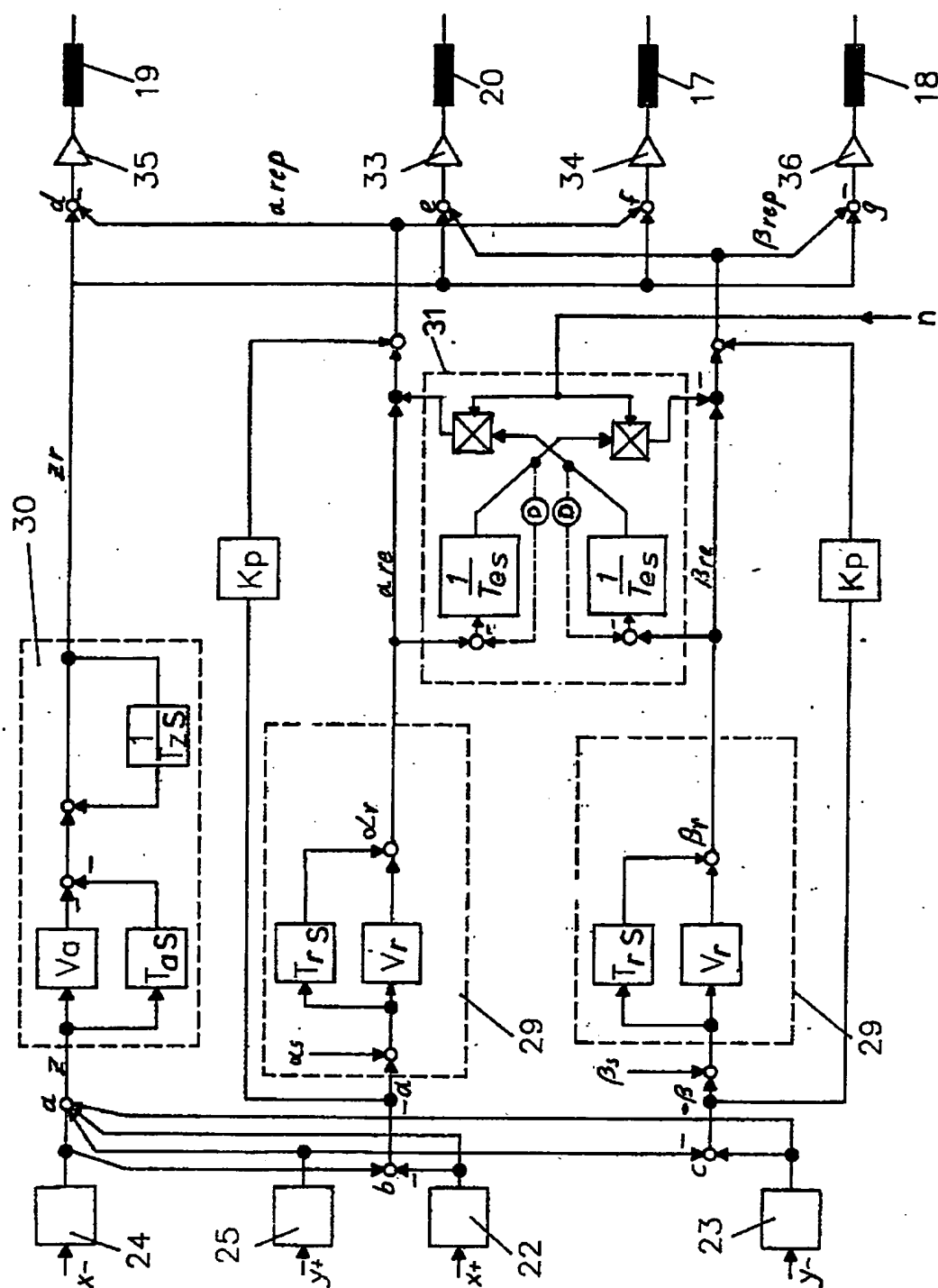


Fig.4

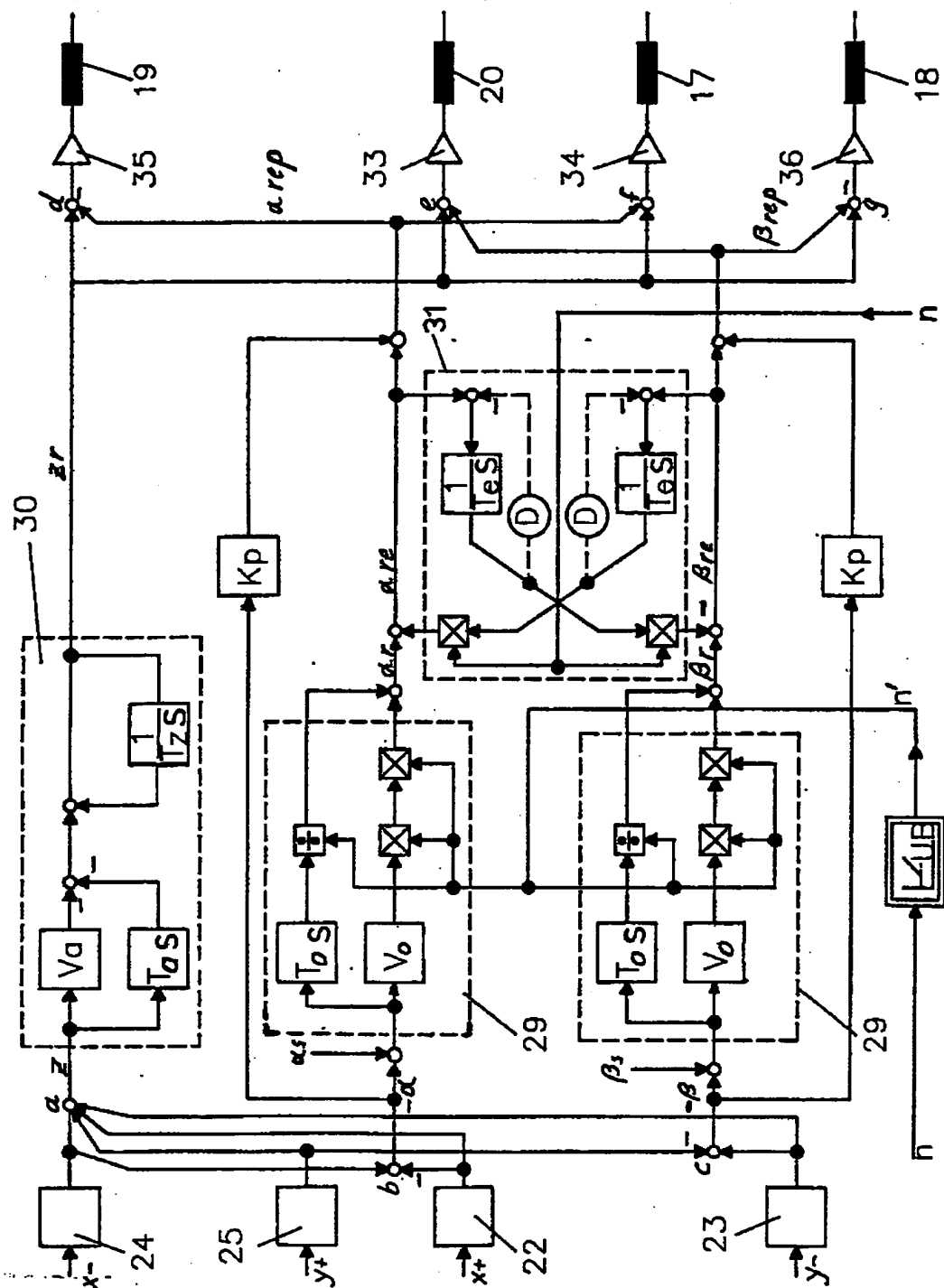


Fig.5

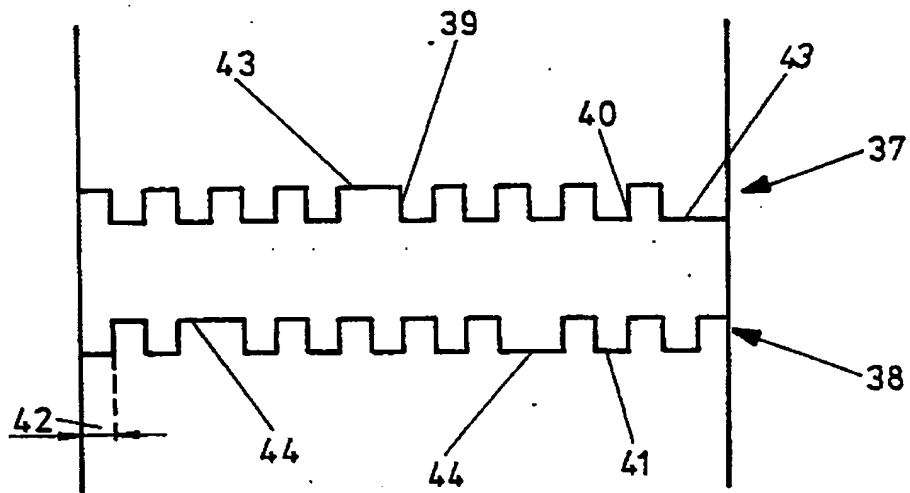
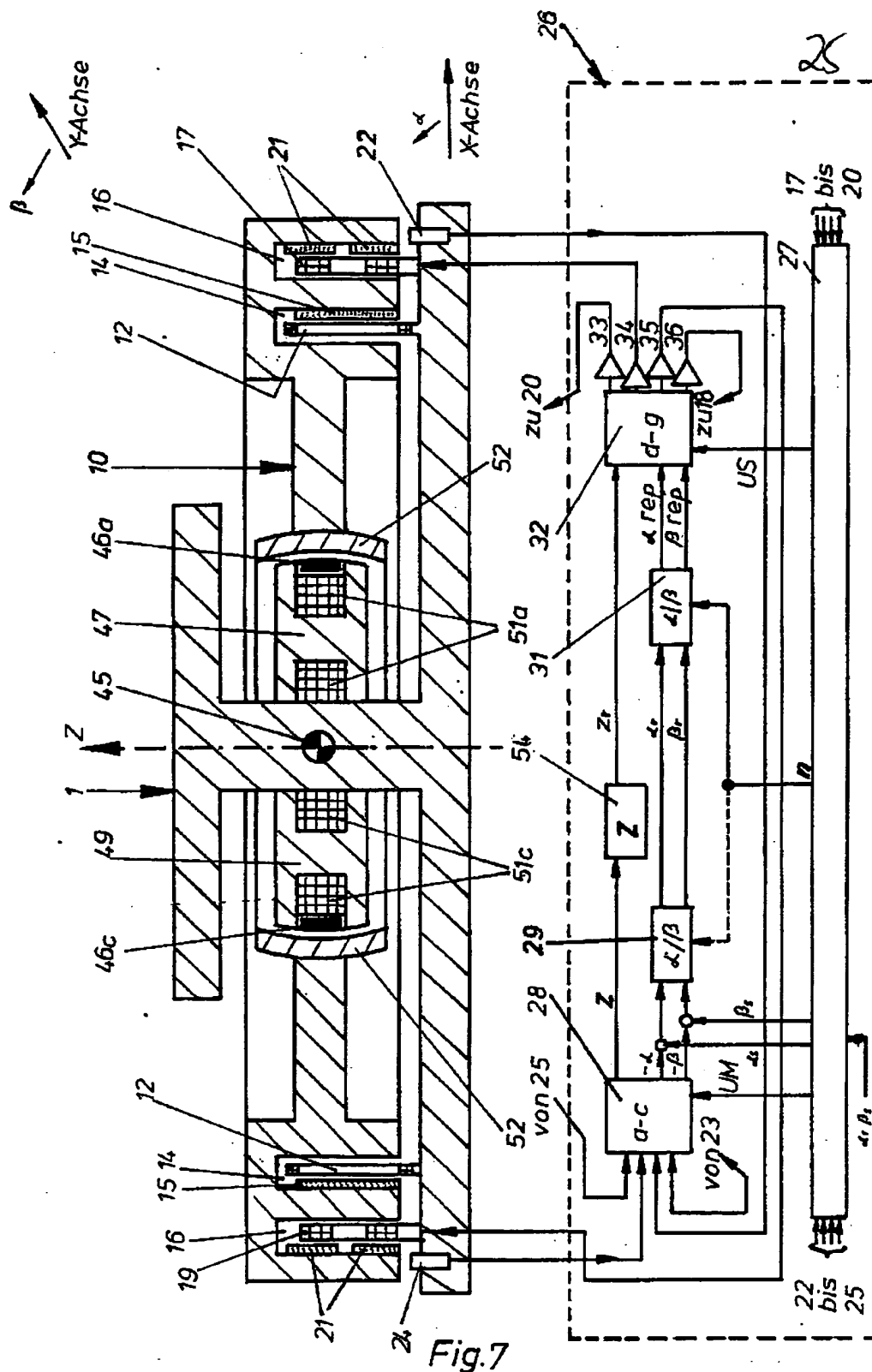


Fig6



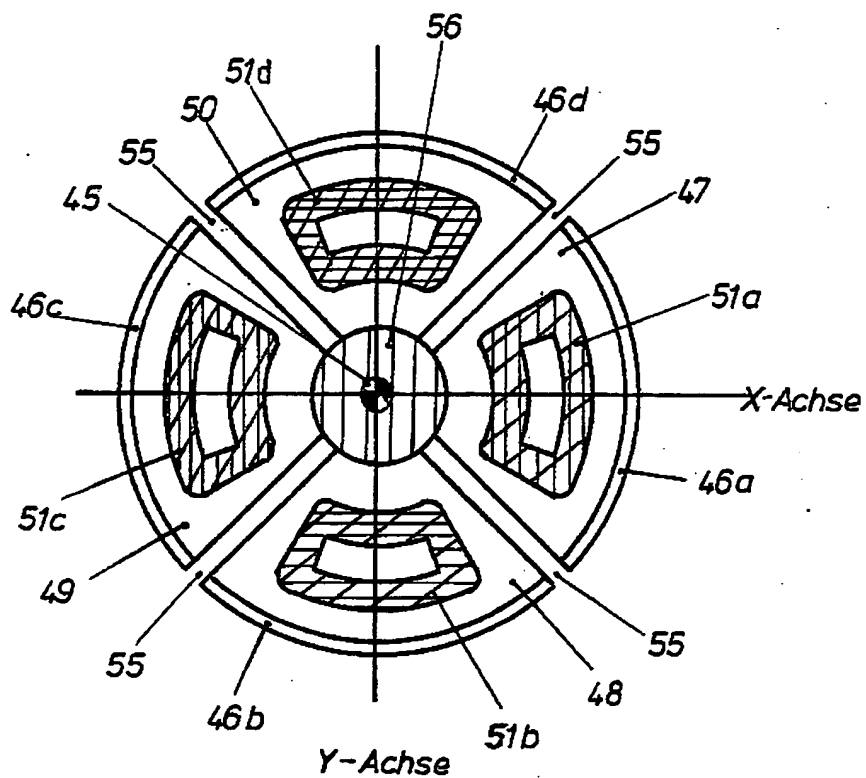


Fig. 8



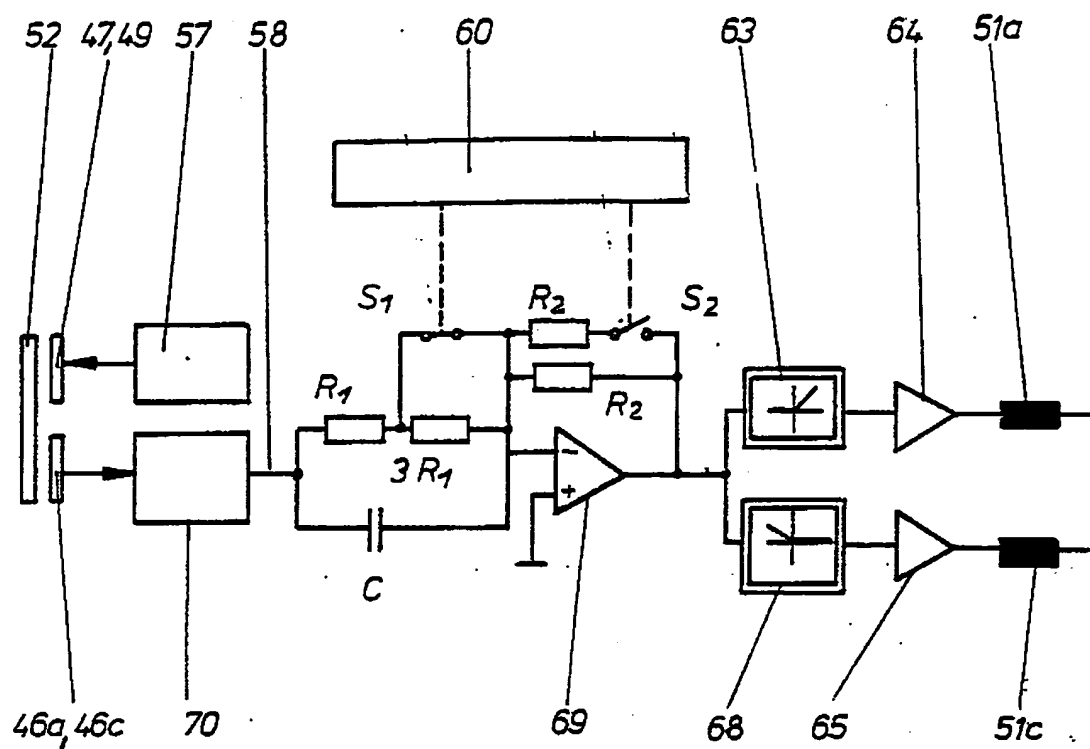


Fig. 9